

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.02.019>

УДК 519.6, 550.8

Н.Л. Миронцов

Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, Киев
E-mail: myrontsov@ukr.net

Особенности численного решения обратной задачи индукционного каротажа в контрастном скважинном разрезе

Представлено членом-корреспондентом НАН Украины А.Н. Трофимчуком

Рассмотрены особенности численного решения обратной неустойчивой задачи геофизического исследования скважин на нефть и газ, а именно задачи индукционного каротажа для контрастных разрезов. Показано, что для этих разрезов влияние скважины на определение геоэлектрических параметров разреза является неустойчивым фактором, который делает невозможным реализацию алгоритма точного решения обратной задачи с использованием традиционных поправок “за скин-эффект” и “за скважину”

Ключевые слова: обратная задача, электрометрия скважин, индукционный каротаж

Пока бурение скважин будет единственным средством извлечения углеводородов из недр Земли, геофизическое исследование скважин (ГИС), и в первую очередь электрометрия, будет не только основным методом определения места расположения углеводородов, но и методом определения их количества в каждом пласте-коллекторе [1, 2], что особенно актуально в настоящее время [3].

Фактически задача выделения продуктивных пластов-коллекторов и определения их геоэлектрических параметров (так называемая обратная задача электрометрии) некорректно поставлена по Адамару и нахождение ее устойчивого решения следует относить не к наукам о Земле, а к задачам численного решения уравнений математической физики.

Такие задачи, как и многие задачи геофизики [4], требуют численного решения сложной, неустойчивой по Адамару, математической обратной задачи.

Решение обратной задачи электрометрии как правило есть процесс итерационный [5], на каждом шаге которого решается прямая задача с помощью того или иного численного метода [6, 7].

Используя методы прямого моделирования общий алгоритм численного решения можно существенно упрощать, применяя физически обоснованные упрощения [8]. При этом окончательный результат необходимо представлять в виде, привычном для Заказчиков геофизических услуг [9].

© Н.Л. Миронцов, 2018

ISSN 1025-6415. Допов. Нац. акад. наук Укр. 2018. № 2

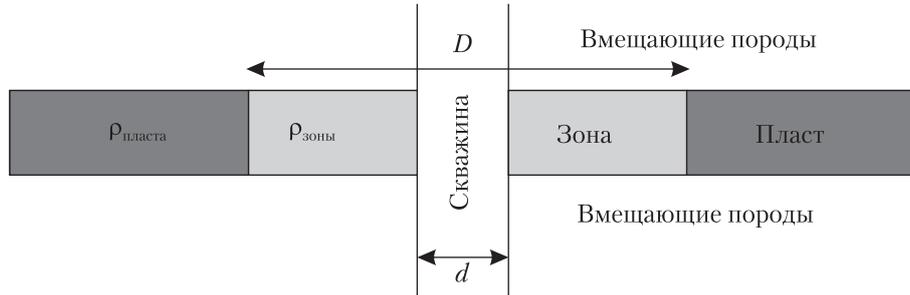


Рис. 1. Модель пласта-коллектора

Следует отметить, что в некоторых случаях возможность быстрого нахождения устойчивого решения таких задач достигается использованием аппаратуры, пространственное разрешение которой позволяет еще на этапе измерения выделять интересующие исследователя продуктивные пласты [10, 11].

Однако теоретическая разработка и практическое внедрение в производство новой аппаратуры – процесс длительный, не всегда зависящий от исследователя. Поэтому при решении конкретной задачи не всегда используется та аппаратура, которая изначально обеспечивает максимальную точность определения геоэлектрических параметров исследуемых пластов в ходе решения обратной задачи [12, 13], а та, которая была доступна исполнителю во время проведения каротажных работ.

Ограничение парка возможной аппаратуры электрметрии является известной и серьезной проблемой исследования Днепровско-Донецкой Впадины (ДДВ) [13].

В ходе выполнения данной работы был использован реальный скважинный материал, полученный аппаратурой четырехзондового индукционного низкочастотного каротажа (ИК) [2, 14] в условиях ДДВ. Этот материал получен в скважинах, заполненных сильнопроводящим буровым раствором удельного электрического сопротивления (УЭС) $\rho_{\text{скв}} < 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, для которого значение параметра контрастности продуктивных пластов, в условиях ДДВ

$$K_{\rho} = \frac{\rho_{\text{породы}}}{\rho_{\text{скв}}} > 20.$$

Такие разрезы являются основным объектом современного исследования в условиях ДДВ, но именно для них (для указанных значений K_{ρ}) применение многозондовой аппаратуры ИК сопряжено со сложностями, анализу которых посвящена данная работа.

Заметим, что основной задачей электрметрии в случае использования четырехзондового комплекса будет определение таких параметров пластов-коллекторов, как УЭС незагрязненной буровым раствором части пласта $\rho_{\text{пласта}}$ (УЭС пласта), УЭС зоны проникновения $\rho_{\text{зоны}}$ (УЭС зоны), диаметр зоны D (рис. 1).

На рис. 2 представлен пример каротажных диаграмм типичного контрастного разреза в условиях ДДВ (столбцы: 1 – глубина; 2 – значения измеренной активной составляющей электрической проводимости; 3 – значения УЭС пласта и УЭС зоны, определенные в ходе решения обратной задачи; 4 – данные двухзондового бокового каротажа; 5 – кавернометрия). В обозначении зондов I0.5; I0.85; I1.26; I2.05 цифрами указана длина каждого из них в метрах.

Решение обратной задачи для контрастного разреза очень показательно с точки зрения оценки искажающего влияния скважины и взаимодействия токов в среде.

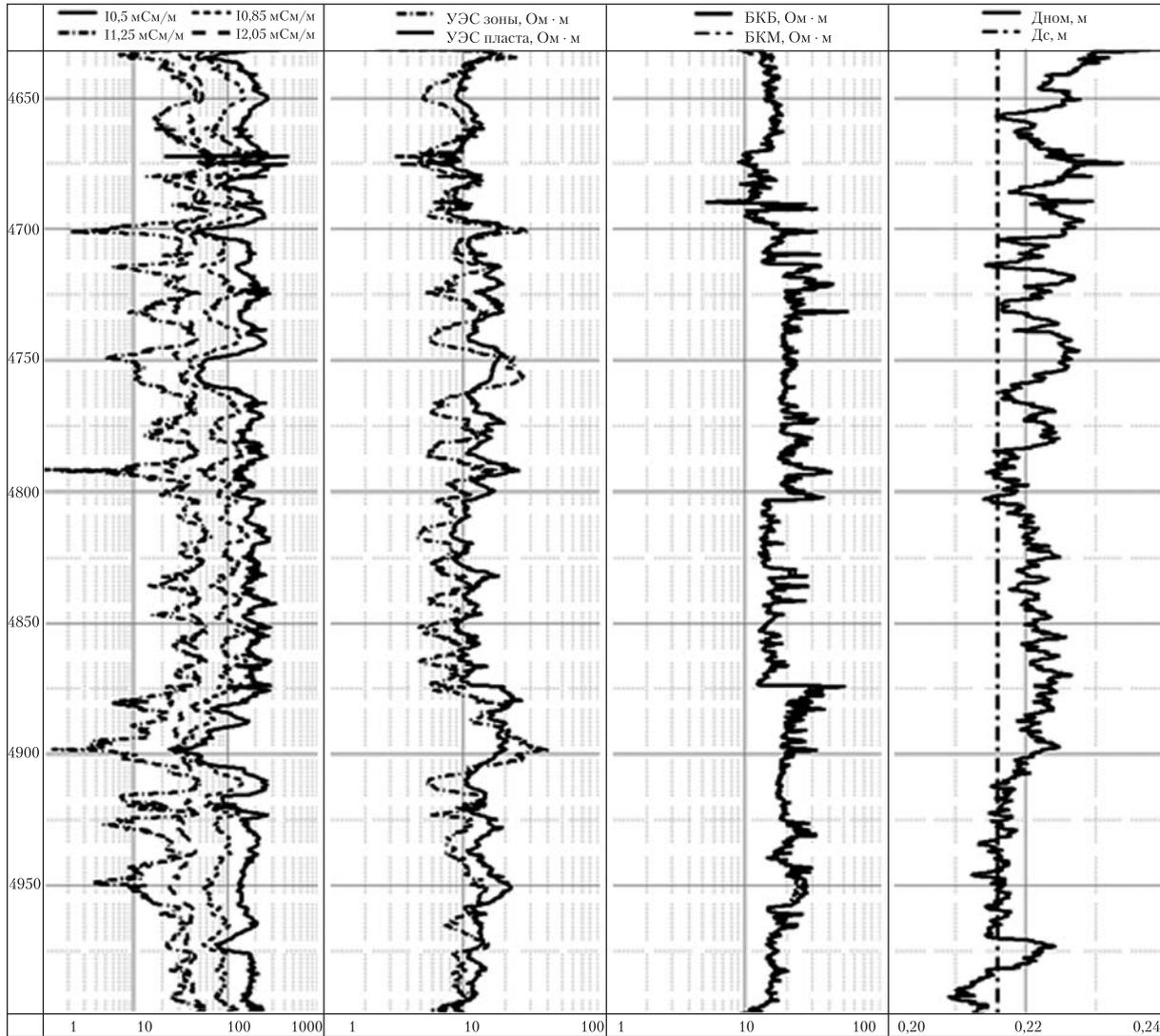


Рис. 2. Каротажные диаграммы в контрастном скважинном разрезе

Оказывается, что в отличие от низкоконтрастных, для этого типа разрезов влияние “вмещающих” на данные каротажа пренебрежимо мало по сравнению с влиянием скважины и влиянием взаимодействия токов в среде.

Проанализируем в первую очередь влияние взаимодействия токов в среде, которое принято учитывать, вводя поправку “за скин-эффект” [1].

Такая поправка вводится с помощью известной зависимости сигнала от бесконечной однородной среды заданной удельной электрической проводимости (УЭП).

Для двухкатушечного зонда (расстояние между точечными катушками L) такая зависимость между наводимой ЭДС и УЭП σ может быть получена аналитически [15]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-p} [(1 + p) \sin p - p \cos p],$$

где $p = L\sqrt{\frac{\sigma\mu\omega}{2}}$; $\epsilon_0 = i\frac{\omega\mu M}{2\pi L^3}$; ω — рабочая частота зонда; M — момент приемного контура; μ — магнитная проницаемость.

Именно пересчет с помощью такой зависимости называют поправкой “за скин-эффект”.

Как показывает прямой расчет, для указанных параметров разреза такая поправка оказывается незначительной.

После введения поправки “за скин-эффект” считается, что токи в среде не взаимодействуют, и мы вправе решать линейную задачу ИК в приближении Долля [1], в котором суммарный сигнал зонда есть сумма сигналов от разноудаленных участков среды [15]. Такое линейное приближение и введение понятия геометрического фактора позволяет нам записать суммарный сигнал:

$$\sigma = \sigma_{\text{скв}}g_{\text{скв}} + \sigma_{\text{зоны}}g_{\text{зоны}} + \sigma_{\text{пласта}}g_{\text{пласта}}, \quad (1)$$

где УЭП скважины $\sigma_{\text{скв}} = 1000/\rho_{\text{скв}}$ (проводимость принято выражать в мСм/м); УЭП зоны $\sigma_{\text{зоны}} = 1000/\rho_{\text{зоны}}$; УЭП пласта $\sigma_{\text{пласта}} = 1000/\rho_{\text{пласта}}$; $g_{\text{скв}}$, $g_{\text{зоны}}$, $g_{\text{пласта}}$ — геометрические факторы скважины, зоны и пласта соответственно.

При этом значения геометрических факторов (для бесконечного пласта) удовлетворяют условию:

$$g_{\text{скв}} + g_{\text{зоны}} + g_{\text{пласта}} = 1. \quad (2)$$

Следуя (1) и (2), можем легко вычислить сигнал только от исследуемой части (пласт и зона):

$$\sigma_{\text{породы}} = \frac{\sigma - \sigma_{\text{скв}}g_{\text{скв}}}{1 - g_{\text{скв}}}. \quad (3)$$

Такой пересчет и называют введением поправки “за скважину”. Для ее введения необходимо знать диаметр скважины (данные кавернометрии, см. рис.2) и УЭП скважины.

В нашем случае $\sigma_{\text{скв}} = 1000/0,43 = 2325,6$ мСм/м, а значения геометрического фактора зондов I0.5, I0.86, I1.25, I2.05 соответственно равны 0,031; 0,0036; 0,0012; 0,00063.

Это означает, что произведение $\sigma_{\text{скв}}g_{\text{скв}}$ в (3) для этого значения УЭС скважины оказывается большим или сопоставимым с величиной, измеряемой УЭП σ . В свою очередь это означает, что неустранимая погрешность сопоставима по уровню с полезным сигналом.

Влияет ли величина такой погрешности на возможность нахождения точного устойчивого решения?

Если проанализировать изменение $\sigma_{\text{скв}}g_{\text{скв}}$ вдоль реального скважинного интервала (см. рис., столбец 5 — данные кавернометрии), то оказывается, что изменение реального диаметра скважины вносит слишком большую и принципиально неустранимую погрешность, а сама задача оказывается неустойчивой (малое изменение диаметра скважины приводит к большому изменению измеряемого сигнала).

На практике это, в частности, приводит к ситуации, когда значения УЭС после введения поправок “за скин-эффект”, “за скважину” и “за вмещающие” даже качественно неверно описывают разрез: на плотных пластах без проникновения показания зондов различной

длины не совпадают, а результатом решения в каждой точке становятся значения $\rho_{\text{пласта}}$ и $\rho_{\text{зоны}}$, которые не одинаковы (см. рис., столбец 3).

В то же время приведенный на рис. 1 интервал скважинного разреза не содержит пластов-коллекторов. Это значит, что на всем этом интервале должно выполняться условие: $\rho_{\text{пласта}} = \rho_{\text{зоны}}$. При этом оказывается, что чем больше каверна, тем большее расхождение наблюдается у определенных $\rho_{\text{пласта}}$ и $\rho_{\text{зоны}}$.

Аналогичный анализ был выполнен для 17 скважин ДДв, заполненных сильно проводящим буровым раствором с УЭС менее 0,5 Ом·м.

На основании полученных и приведенных результатов можно заключить, что при наличии существенных каверн и при значении УЭС скважины $\rho_{\text{скв}} < 1$ Ом·м, для которого значение параметра контрастности будет $K_p > 20$ (соответствует условиям ДДв), использование при решении обратной задачи поправки “за скважину” не позволяет найти точное решение.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson B.I. Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response. Delft: Delft Univ. Press, 2001. 377 с.
2. Миронцов Н.Л. Численное моделирование электрометрии скважин. Киев: Наук. думка, 2012. 224 с.
3. Довгий С.О., Євдошук М.І., Коржнев М.М., Куліш Є.О., Курило М.М., Малахов І.М., Трофимчук О.М., Яковлев Є.О. Енергетично-ресурсна складова розвитку України. Київ: Ніка-Центр, 2010. 263 с.
4. Страхов В.Н. О решении некорректных задач магнито- и гравиметрии, представляемых интегральным уравнением типа свертки. *Физика Земли*. 1967. № 4. С. 36–54.
5. Колосов А.Л. Прямые, смешанные и обратные задачи электрометрии скважин. Київ: Наук. думка, 1985. 196 с.
6. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. Москва: Наука, 1971. 552 с.
7. Миронцов М.Л. Метод розв'язання прямої та зворотної задачі електричного каротажа. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2007. № 2. С. 128–131.
8. Гомилко А.М., Савицкий О.А., Трофимчук А.Н. Методы суперпозиции, собственных функций и ортогональных многочленов в граничных задачах теории упругости и акустики. Киев: Наук. думка, 2016. 433 с.
9. Технологія дослідження нафтогазових скважин на основі ВІКІЗ. Методическе керівництво: Епов М.І., Антонов Ю.Н. (ред.). Новосибірськ: НІЦ ОІГГМ СО РАН, Изд-во СО РАН, 2000. 270 с.
10. Миронцов Н.Л. Новый принцип многозондового электрического каротажа. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2010. № 6. С. 103–106.
11. Миронцов Н.Л. О методе импульсного индукционного каротажа. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2010. № 7. С. 110–112.
12. Миронцов Н.Л. Аппаратурно-методический комплекс для исследования коллекторов аномально низкого сопротивления. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2012. № 1. С. 117–122.
13. Миронцов Н.Л. Эффективный метод исследования сложнопостроенных анизотропных пластов-коллекторов в терригенных разрезах. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2012. № 5. С. 119–125.
14. Myrontsov N. Method for improving the spatial resolution of resistivity logging. *Геофиз. журнал*. 2010. № 4. С. 119–121.
15. Кауфман А.А. Теория индукционного каротажа. Москва: Наука, 1965. 236 с.

Поступило в редакцию 19.09.2017

REFERENCES

1. Anderson, B. I. (2001). Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response. Delft: Delft Univ. Press.
2. Myrontsov, M. L. (2012). Numerical modeling of electrometry in wells. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).

3. Dovgiy, S. O., Yevdoschuk, M. I., Korjnev, M. M., Kulish, Ye. O., Kurilo, M. M., Malakhov, I. M., Trofimchuk, O. M. & Yakovlev, Ye. O. (2010). Energy resource component of Ukraine's development. Kiev: Nika-Center (in Ukrainian).
4. Strakhov, V. N. (1967). On the solution of ill-posed problems of magneto- and gravimetry, represented by an integral equation of convolution type. Physics of the Earth. No. 4, pp. 36-54 (in Russian).
5. Kolosov, A. L. (1985). Direct, mixed and inverse problems of well electrometry. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
6. Samarskiy, A. A. (1971). Introduction to the theory of difference schemes. Moscow: Nauka (in Russian).
7. Myrontsov, M. L. (2007). Method of solving the direct and inverse problem of electric logging. Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr. No. 2, pp. 128-131 (in Ukrainian).
8. Gomilko, A. M., Savitsky, O. A. & Trofimchuk, A. N. (2016). Methods of superposition, eigenfunctions and orthogonal polynomials in boundary value problems in the theory of elasticity and acoustics. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
9. Eпов, M. I. & Antonov, Yu. N. (Eds.). (2000). Technology of exploration of oil and gas wells based on VIKIZ. Methodical direction. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS (in Russian).
10. Myrontsov, M. L. (2010). A new principle of multiprobe electric logging. Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr., No. 6, pp. 103-106 (in Russian).
11. Myrontsov, N. L. (2010). On the method of electromagnetic-pulse logging. Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr., No. 7, pp. 110-112 (in Russian).
12. Myrontsov, N. L. (2012). Hardware-methodical complex for the investigation of collectors with abnormally low resistance. Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr., No. 1, pp. 117-122 (in Russian).
13. Myrontsov, N. L. (2012). Efficient investigation method for complex structures and anisotropic formations in clastic deposits. Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr., No. 5, pp. 119-125 (in Russian).
14. Myrontsov, N. L. (2007). A quick method of solving the inverse problem of induction logging. Geophys. J., No. 5, pp. 128-131 (in Ukrainian).
15. Kaufman, A. A. (1965). Theory of induction logging. Moscow: Nauka (in Russian).

Received 19.09.2017

М.Л. Миронцов

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ
E-mail: myrontsov@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ ЧИСЛОВОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ІНДУКЦІЙНОГО КАРОТАЖУ В КОНТРАСТНОМУ СВЕРДЛОВИННОМУ РОЗРІЗІ

Розглянуто особливості числового розв'язання оберненої нестійкої задачі геофізичного дослідження свердловин на нафту і газ, а саме задачу індукційного каротажу, для контрастних свердловинних розрізів. Показано, що для таких розрізів вплив свердловини на визначення геоелектричних параметрів розрізу є неусувним фактором, який робить неможливим реалізацію алгоритму точного розв'язання оберненої задачі з використанням традиційних поправок "за скін-ефект" та "за свердловину".

Ключові слова: обернена задача, електрометрія свердловин, індукційний каротаж.

М.Л. Myrontsov

Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NAS of Ukraine, Kiev
E-mail: myrontsov@ukr.net

FEATURES OF A NUMERICAL SOLUTION OF THE INVERSE PROBLEM OF INDUCTION LOGGING IN THE CONTRAST WELLS

The features of a numerical solution of the inverse unstable problem for the electrometry of oil and gas in contrast wells are considered. It is shown that, for these wells, the influence of the borehole on the determination of the geoelectric parameters of a section is an unavoidable factor that makes it impossible to implement the exact solution algorithm for the inverse problem, by using traditional corrections "for the skin-effect" and "for the borehole".

Keywords: inverse problem, electrometry in wells, induction logging.